THE RARE EARTH METALS, ALLOYS AND COMPOUNDS – NEW MAGNETIC MATERIALS FOR TECHNICS

K. P. BELOV

Magnetic properties of rare earth metals, alloys, and oxide compounds are considered. These materials possess enormous magnetic anisotropy energy, magnetostriction, and other unique properties. These capacities permits the construction of compact, powerful magnets, sound emittors, and other effective technical devices.

Рассказано о магнитных свойствах редкоземельных металлов, их сплавов и оксидных соединений. Данные материалы обладают огромными величинами энергии магнитной анизотропии, магнитострикции и другими уникальными свойствами. Это позволяет создавать малогабаритные сильные постоянные магниты, излучатели звука большой мощности и другие эффективные технические устройства.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ, СПЛАВЫ И СОЕДИНЕНИЯ – НОВЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕХНИКИ

К. П. БЕЛОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

К ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ МАГНИТНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

В глубокой древности, более двух тысяч лет назад, греки и китайцы знали о свойстве магнитного железняка (горной породы магнетита) притягивать железные предметы. Древние люди знали также о том, что намагниченный стерженек магнетита, подвешенный на нити (прообраз компаса), ориентируется по меридиану, т.е. в направлении север – юг. Применение магнитного компаса в кораблевождении сыграло большую роль в открытии новых земель и стран и, в частности, 500 лет назад в открытии Колумбом Америки.

Однако большое значение магнитных материалов для технического прогресса человечество ощутило только в середине XIX века после открытия Фарадеем закона электромагнитной индукции, когда стало возможным конструирование и производство электрогенераторов, моторов, трансформаторов и других аппаратов и приборов для электротехники и техники средств связи.

Важной деталью всех перечисленных машин и аппаратов является магнитный сердечник – концентратор магнитного потока. Долгое время в качестве сердечника служило "мягкое" железо, несколько позднее стали применять сплавы никель–железо, так называемые пермаллои (от англ. *alloy* – сплав), обладающие лучшими магнитными параметрами.

Кроме "мягких" магнитных материалов, производились "магнитожесткие" магнитные материалы для изготовления постоянных магнитов (автономных источников магнитного поля, не требующих электроэнергии). Эти постоянные магниты применяли в электроизмерительных приборах и других аппаратах. Для изготовления постоянных магнитов долгое время использовали углеродистое железо и железокобальтовые сплавы.

В наше время трудно назвать какую-либо отрасль техники, в которой в той или иной форме не применялись бы магнитные материалы. Развитие радио- и электротехники, ядерной и космической техники требует магнитных материалов с совершенно новыми свойствами. Поэтому неудивительно, что в разных странах мира, в том числе и в России, интенсивно ведутся экспериментальные и теоретические исследования по физике магнитоупорядоченных

веществ (ферромагнитных и ферримагнитных, см. далее), на базе которых создаются новые, более совершенные магнитные материалы.

Основа современного магнитного материаловедения – по-прежнему металлы группы железа (Fe, Ni, Co); из них изготовляют различные металлические и диэлектрические оксиды (соединения Fe и других металлов с кислородом, называемые ферритами) магнитные материалы. Задача физики магнетизма – разработать пути дальнейшего изыскания новых магнитных материалов и усовершенствование уже применяемых. Однако эту задачу невозможно решить на основе использования только металлов группы железа.

В 60-е годы наметилась тенденция создания магнитных материалов на основе металлов, входящих в группу лантаноидов: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Sm, Eu и других, обычно называемых редкоземельными. Редкоземельными они называются потому, что рассеяны в земной коре и нужна специальная технология извлечения их из породы. Раньше практически не было возможности исследовать их магнитные свойства. Ситуация резко изменилась в послевоенные годы, когда для выделения редкоземельных элементов из породы стало возможным использование технологии, разработанной для разделения изотопов урана и применяемой в атомной промышленности. Стоимость редкоземельных металлов резко снизилась, и начались интенсивные работы по исследованию их магнитных свойств. Главным условием успеха стало то, что были разработаны методы выращивания монокристаллов этих металлов достаточно больших размеров. Именно монокристаллы стали использовать для того, чтобы определить основные магнитные константы, на основе которых можно оценить возможности тех или иных редкоземельных металлов и их сплавов в качестве магнитных материалов для применения в технике. В результате проведенных исследовательских работ за рубежом и в нашей стране были найдены редкоземельные материалы, обладающие огромной магнитной энергией, пригодные для изготовления очень мощных постоянных магнитов, сплавов и соединений, имеющих высокие (“гигантские”) магнитострикции, т.е. изменяющие свои размеры при намагничивании (от латин. *strictio* – сжатие, натягивание) и др. Все эти материалы представляют большой интерес для современной техники.

Прежде чем рассказать о редкоземельных магнитных материалах и их свойствах, необходимо объяснить, в чем заключается явление магнитного упорядочения и какими величинами оно характеризуется.

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ФИЗИКИ МАГНИТОУПОРЯДОЧЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Магнетизм таких веществ определяется магнитными свойствами атомов так называемых переходных элементов, входящих в эти вещества. Переходными они называются потому, что в их атомах некоторые из электронных оболочек (*d*- и *f*-оболочки) не полностью “заселены” электронами; как мы увидим дальше, в этом и состоит причина сильного магнетизма подобных атомов.

Магнетизм атома характеризуют магнитным моментом $\mathbf{M}_{ат}$, который создается электронами атома. Электроны участвуют в создании $\mathbf{M}_{ат}$ двояко. Во-первых, каждый электрон, вращаясь вокруг ядра, образует микроскопический замкнутый ток, который обладает магнитным моментом; величина его равна произведению указанного микроскопического тока на площадь орбиты электрона. Этот магнитный момент называется орбитальным, обозначается $\mathbf{M}_{орб}$ и изображается в виде вектора, направленного перпендикулярно площади орбиты (рис. 1). Во-вторых, каждый электрон обладает своеобразным собственным моментом (согласно выводам квантовой механики), его называют спиновым и обозначают $\mathbf{M}_{сп}$. В одноэлектронном атоме $\mathbf{M}_{орб}$ и $\mathbf{M}_{сп}$ после векторного сложения дают атомный магнитный момент $\mathbf{M}_{ат}$.

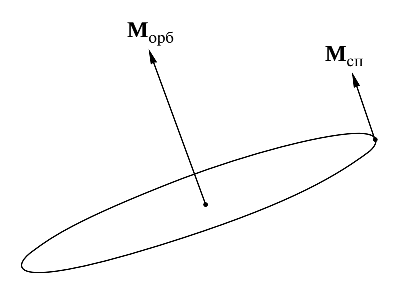


Рис. 1. Схематическое изображение орбитального $\mathbf{M}_{орб}$ и спинового $\mathbf{M}_{сп}$ магнитных моментов одноэлектронного атома.

В многоэлектронном атоме дело обстоит сложнее. Электронный остов атома состоит из оболочек, которые обозначаются символами *s*, *p*, *d* и *f*. В первой из них, ближайшей к атомному ядру *s*-оболочке, содержится два электрона со спинами, направленными антипараллельно (рис. 2), во второй, *p*-оболочке, шесть электронов со спинами, направленными так, как показано на рис. 2. В результате в *s*- и *p*-оболочках возникает компенсация электронных спиновых моментов и они не имеют

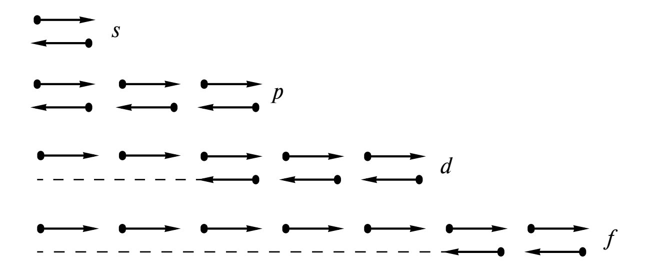


Рис. 2. Заполненные электронные *s*- и *p*-оболочки и незаполненные *d*- и *f*-оболочки атома.

магнитного момента. (Сказанное можно отнести и к орбитальным магнитным моментам: они компенсируют друг друга.) В следующих, более удаленных от ядра *d*- и *f*-оболочках при полном заполнении электронами должно содержаться соответственно 10 и 14 электронов. Но, оказывается, эти оболочки, как правило, полностью не заполняются, например так, как показано на рис. 2. Видно, что в *d*-оболочке до полного заполнения не хватает двух электронов, а в *f*-оболочке – пяти электронов. Поэтому в атомах с незаполненными *d*- и *f*-оболочками возникают значительные по величине $\mathbf{M}_{ат}$. Как следует из рис. 2, наибольший спиновый магнитный момент *d*-оболочки возникает тогда, когда все пять электронов имеют $\mathbf{M}_{сп}$, направленные в одну сторону, а противоположных им по направлению магнитных моментов нет. В *f*-оболочках однонаправленных $\mathbf{M}_{сп}$ имеется семь. Отсюда ясно, что атомы с незаполненной *f*-оболочкой могут обладать бóльшим магнетизмом, чем атомы с незаполненной *d*-оболочкой, так как в первых "однонаправленных" спиновых моментов – семь, а во вторых – пять. Элементы, имеющие атомы с незаполненной *f*-оболочкой, – это редкоземельные элементы, главными представителями которых являются неодим (Nd), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), тулий (Tm).

До сих пор мы рассматривали магнитные свойства атомов с незаполненными *d*- и *f*-оболочками вне кристаллической решетки. При "помещении" в кристаллическую решетку их магнитные свойства, как правило, изменяются. Дело в том, что электрические поля кристалла, воздействуя на электронные орбиты, как бы закрепляют их, в результате орбитальный момент подавляется. Это явление принято называть "замораживанием" $\mathbf{M}_{ор}$; оно очень характерно для атомов группы Fe, так что магнетизм кристаллов, в которые входят эти атомы, почти полностью обусловлен спиновыми магнитными моментами. Напротив, в кристаллах редкоземельных веществ "замораживание" $\mathbf{M}_{орб}$ ничтожно мало и магнетизм обусловлен и спиновыми, и орбитальными моментами, т.е. магнетизм редкоземельных кристаллов сильнее, чем у тех, в которые входят атомы группы Fe. Причина того, что электрические поля в редкоземельных кристаллах мало влияют на $\mathbf{M}_{орб}$, состоит в том, что *f*-оболочка в редкоземельных атомах лежит в глубине атома, сверху лежат другие электронные оболочки, которые экранируют действие электрических полей на *f*-оболочку.

В очень большом числе кристаллов, содержащих атомы переходных элементов, возникает явление магнитного упорядочения – самопроизвольная ориентация атомных магнитных моментов $\mathbf{M}_{ат}$ (самопроизвольная в том смысле, что эта ориентация происходит без участия внешнего магнитного поля **H**, но под действием эффективного поля, создаваемого кристаллической решеткой). Если магнитные моменты $\mathbf{M}_{ат}$ ориентируются параллельно друг другу (рис. 3а), возникает ферромагнетизм; если они располагаются антипараллельно друг другу, то возникает антиферромагнетизм (коллинеарный – векторы, лежащие на одной прямой) (рис. 3б). Довольно часто наблюдается неколлинеарный антиферромагнетизм. В силу особых свойств симметрии кристаллов, в которых он возникает, моменты $\mathbf{M}_{ат}$ повернуты на некоторый малый угол; такая структура должна давать малый магнитный момент – $\Delta\mathbf{M}$ (рис. 3в). Это явление получило название "слабого" ферромагнетизма.

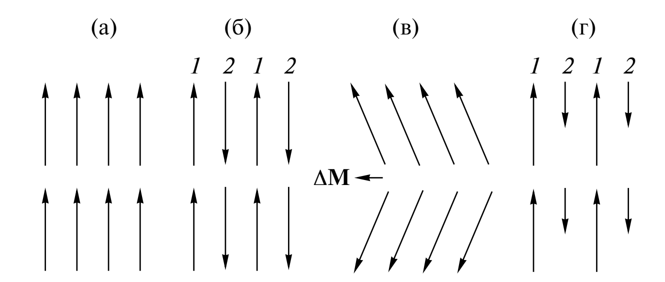


Рис. 3. Различные типы магнитного упорядочения: а – ферромагнитное; б – антиферромагнитное – коллинеарное; в – антиферромагнитное – неколлинеарное (возникновение "слабого" ферромагнитного момента $\Delta\mathbf{M}$); г – ферримагнитное упорядочение (*1* и *2* – магнитные подрешетки).

Данное явление возникает в так называемых редкоземельных ортоферритах – оксидах, имеющих формулу $RFeO_3$, где R – редкоземельный элемент. Есть редкоземельные оксиды, обладающие более сложной формулой $R_3Fe_5O_{12}$, называемые ферритами-гранатами, в которых возникает нескомпенсированный антиферромагнетизм, получивший название ферримагнетизм (от слова "феррит"). Кристаллическую решетку этих веществ (и антиферромагнетиков) можно представить как бы из двух вставленных друг в друга подрешеток 1 и 2. В подрешетку 1 входят атомы редкоземельных элементов, магнитные моменты $\mathbf{M}_{ат}$ которых направлены вверх, а в подрешетке железа 2 моменты $\mathbf{M}_{ат}$ направлены вниз (рис. 3г), при этом, естественно, $\mathbf{M}_{ат}$ редкоземельных и атомов железа различны. Это приводит к нескомпенсированному антиферромагнетизму (подрешетки 1 и 2 магнитно не гасят друг друга), т.е. к ферримагнетизму. Такое вещество имеет намагниченность, сравнимую с намагниченностью обычных ферромагнетиков. Намагниченность **I** – это магнитный момент образца **M**, отнесенный к его объему *V*, или, что то же, число однонаправленных моментов $\mathbf{M}_{ат}$ в 1 $см^3$ образца. Намагниченность *I* и напряженность магнитного поля *H* в настоящее время чаще всего измеряют в единицах гауссовой системы. В ней *I* измеряется в гауссах (Гс), а *H* – в эрстедах (Э). В международной системе СИ *I* и *H* измеряют в А/м.

Для ферромагнетиков характерна, как и для ферримагнетиков, нелинейная зависимость намагниченности *I* от магнитного поля *H* (рис. 4)

(создаваемого соленоидом или электромагнитом), магнитный гистерезис – отставание изменения I от H (от греч. *hysteresis* – запаздывание), возникающий при циклическом изменении H (рис. 4). Характеристиками ферро- и ферримагнетика являются также: I_s – намагниченность насыщения; она достигается в поле H_s, при котором ветвь кривой намагничивания приобретает горизонтальный ход (рис. 4), I_r – остаточная намагниченность, которая возникает в образце после выключения поля **H**, и коэрцитивная сила H_c (от латин. *coercitio* – задерживание). Чем больше H_c, тем "прочнее" материал удерживает остаточную намагниченность.

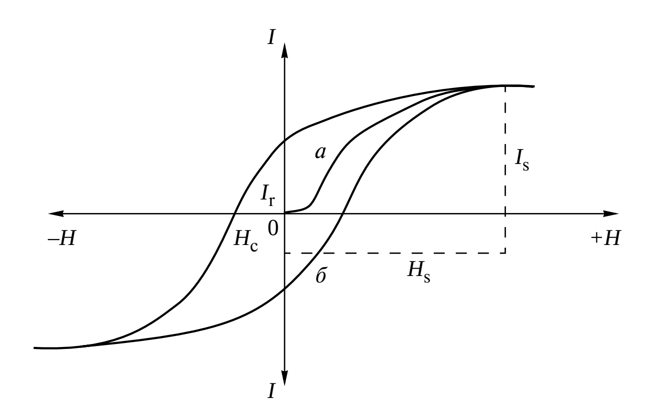


Рис. 4. Кривая намагниченности (*a*) и петля магнитного гистерезиса (*б*). I_s – намагниченность насыщения, H_s – поле насыщения, I_r – остаточная намагниченность, H_c – коэрцитивная сила. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше потери на перемагничивание материала.

Возникает вопрос: что это за эффективное поле в кристаллической решетке, которое приводит к явлению магнитного упорядочения? Это так называемое "обменное" поле. Оно возникает между соседними магнитными атомами в результате взаимодействия их *d*-электронов (в случае металлов и соединений группы Fe) и *f*-электронов (в случае редкоземельных веществ). Однако это не простое электростатическое (кулоновское) взаимодействие электронов; в механизме его принимают участие не только электрические заряды, но и спиновые моменты электронов. Это квантовое электростатическое взаимодействие. Обменным его назвали потому, что в процессе взаимодействия электроны соседних атомов как бы обмениваются местами. Величину обменной энергии данного ферро- или ферримагнетика можно оценить по величине температуры, при которой магнитное упорядочение разрушается тепловым движением. Эта температура называется точкой Кюри (T_C) (рис. 5) по имени французского ученого, открывшего ее.

Обменное взаимодействие существует и между электронами в *d*- и *f*-оболочках, т.е. внутри атома; в результате этого внутриатомного обменного взаимодействия спиновые магнитные моменты в этих оболочках ориентируются параллельно друг другу (рис. 2).

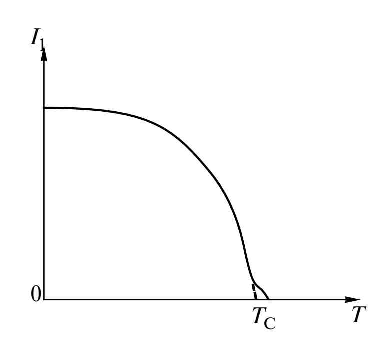


Рис. 5. Зависимость самопроизвольной намагниченности I_s от температуры T; T_C – температура (или точка) Кюри ферро- и ферримагнетика. При $T = T_C$ происходит разрушение тепловым движением магнитного упорядочения и поэтому T_C может служить мерой обменной энергии, которая приводит к магнитному упорядочению моментов $\mathbf{M}_{ат}$ в веществе.

В кристалле магнитоупорядоченного вещества существует и магнитное взаимодействие; оно по величине обычно меньше обменного, но играет весьма существенную роль, так как обусловливает явление магнитной анизотропии, магнитострикции и разбиение ферро- и ферримагнетиков на магнитные домены (области с однонаправленным $\mathbf{M}_{ат}$). Все эти явления "участвуют" в формировании свойств технических магнитных материалов.

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Ниже приведено несколько примеров эффективного использования магнитных редкоземельных металлов, их сплавов и оксидных соединений в технике.

1. **Материалы с огромной магнитной энергией анизотропии для изготовления постоянных магнитов.** Эти материалы обладают очень большой по сравнению с соответствующими материалами на основе группы Fe энергией магнитной анизотропии. Она состоит в том, что существует неравноценность энергии намагничивания по осям кристалла. Например, в гексагональном кристалле металла диспрозия Dy (рис. 6а) ось легкого намагничивания (вдоль которой энергия намагничивания мала) лежит в направлении, перпендикулярном к гексагональной оси **c**, а вдоль оси **c** кристалла намагничивание происходит с трудом; магнитное насыщение достигается при приложении большого поля H (рис. 6б) (**c** – ось трудного намагничивания). Магнитоанизотропные свойства кристаллов характеризуются константой магнитной анизотропии K_1, величина которой пропорциональна разности энергий намагничивания кристалла

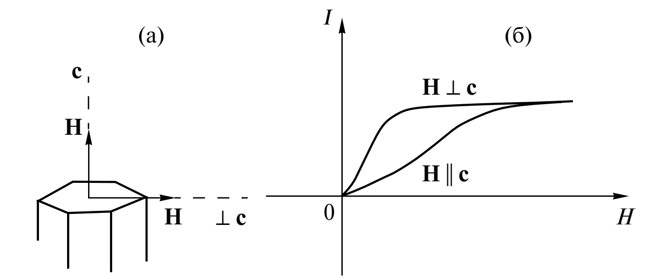


Рис. 6. Магнитная анизотропия в гексагональном кристалле диспрозия. а – Ориентация поля **H** вдоль направления легкого (**H**⊥**c**) и трудного намагничивания (**H** ∥ **c**). б – Кривые намагничивания вдоль направления оси легкого (**H** ⊥ **c**) и трудного намагничивания (**H** ∥ **c**).

в направлении трудного и легкого намагничивания. Большие энергии магнитной анизотропии, свойственные редкоземельным веществам, играют решающую роль при создании материалов для постоянных магнитов. Соединения $SmCo_5$, $NdCo_5$ благодаря высоким K_1 и I_s при соответствующей технологической обработке позволяют получить рекордные для подобных материалов коэрцитивные силы (до 10^4 Э) и огромные магнитные энергии для постоянных магнитов (произведение $H_cI_s \sim 10^6$ Гс Э), что на два порядка больше, чем соответствующие энергии для магнитов из металлов группы Fe. Это, в свою очередь, дает возможность изготовлять магниты в несколько десятков раз сильнее, чем магниты на основе металлов группы Fe; они получили широкое применение там, где требуется создавать сильные магнитные поля при минимальном весе и габаритах: магниты для миниатюрных электромоторов, в магнитофокусирующих системах электронных микроскопов, в мощных электронных лампах магнетронах.

2. **Материалы с высоким магнитным насыщением.** Эти материалы необходимы для изготовления сердечников электромагнитов и других устройств для получения сильного магнитного поля. До сих пор для этой цели используются Fe и некоторые Fe–Co-сплавы, обладающие достаточно высокими намагниченностями насыщения I_s. На основе редкоземельных элементов можно приготовить материал, у которого I_s гораздо больше. Редкоземельные атомы имеют большие величины $\mathbf{M}_{ат}$. Причина – отсутствие "замораживания" орбитального момента в кристаллах, а также то, что в *f*-оболочках, ответственных в этих атомах за магнетизм, в создании $\mathbf{M}_{ат}$ могут участвовать семь спиновых магнитных моментов, тогда как в атомах группы Fe таких моментов пять. Благодаря этому обстоятельству многие редкоземельные металлы (Gd, Dy, Tb, Er, Eu) имеют величины I_s (при 0 K) более высокие, чем Fe и Fe–Co-сплавы. Например, Dy имеет величину I_s в 1,7 раза большую, чем I_s для Fe (для Dy при 0 K величина $I_s = 3000$ Гс, тогда как для Fe она при той же температуре равна 1720 Гс). Однако использование таких металлов, как Dy, Ho, Er, в поликристаллическом состоянии практически невозможно, так как поле магнитного насыщения H_s для них необычайно велико (~10^6 Э). Причина этого – существование в них громадной энергии магнитной анизотропии.

Недавно был найден способ уменьшить энергию анизотропии путем сплавления Dy с Er или Ho с Er. Дело в том, что Er и Dy имеют разные знаки констант K_1 (в Dy K_1 положительна, в Er – отрицательна), поэтому в указанных сплавах происходит частичная компенсация сил магнитной анизотропии, тогда намагниченность I_s достигается в приемлемых полях ($H = 5 \cdot 10^4$ Э). Такие сплавы применяются для изготовления сердечников сверхпроводящих электромагнитов.

Для ряда целей важно иметь материалы с высоким насыщением и одновременно обладающие диэлектрическими или полупроводниковыми свойствами (для снижения энергетических потерь на вихревые токи). Таким материалом может служить ферромагнитный оксид европия (EuO). Оказалось, что у него величина I_s значительно выше, чем у ферритов, которые обычно используются для указанных целей.

Недостаток редкоземельных магнитных материалов с высоким магнитным насыщением – низкотемпературный интервал их применения, так как у них точки Кюри низки.

3. **Материалы для создания эффективных запоминающих устройств ЭВМ.** Возникновение доменов в магнитоупорядоченных веществах есть результат конкуренции энергии обменного и магнитного взаимодействий. Обменные силы стремятся удержать магнитные моменты атомов в параллельном положении, а магнитные – в антипараллельном. В результате этого ферро- и ферримагнетики разбиваются на малые области с определенными направлениями намагниченности. В тонких пластинках феррита-граната гадолиния $Gd_3Fe_5O_{12}$ (с малыми добавками Ga и Al) существуют хорошие условия для возникновения очень маленьких (несколько микрон) магнитных доменов, называемых цилиндрическими или пузырьковыми. Домены при наложении локальных неоднородных магнитных полей, например, создаваемых маленькими магнитиками или маленькими проволочными витками с током, могут быстро в этой пластинке передвигаться. Это явление в настоящее время используется для создания нового типа элементов памяти в электронно-вычислительных машинах.

Недавно был обнаружен интересный факт: редкоземельные сплавы Gd–Fe и Tb–Fe (в виде напыленных пленок) представляют собой атомно-разупорядоченные структуры, т.е. они аморфны и в то же время в них сохраняется ферримагнитное упорядочение. Эти сплавы обладают, кроме того, большой магнитной анизотропией, такое сочетание свойств способствует образованию в них очень маленьких цилиндрических доменов. Аморфные редкоземельные ферримагнитные пленки удобно использовать для магнитооптической и

магнитозвуковой записи, так как в них нет кристаллитных зерен и, следовательно, не происходят резкие перемещения доменной границы при намагничивании, поэтому соотношение между сигналом и шумом в них лучше, чем в поликристаллическом образце того же сплава.

4. **Материалы с гигантской магнитострикцией.** Магнитострикция – изменение длины образца магнитоупорядоченного вещества при его намагничивании – обычно оценивается безразмерной величиной: $\lambda = \Delta l / l$, где l – длина образца, Δl – удлинение образца в магнитном поле. Магнитострикция в кристалле создает магнитоупругую (добавочную) анизотропию, которая (как и K_1) оказывает сильное влияние на ход кривой намагничивания. Металлы Tb, Dy, Ho, Er и ферриты-гранаты этих металлов (например, $Tb_3Fe_5O_{12}$) при низких температурах имеют необычайно высокие эффекты магнитострикции, на два – три порядка больше, чем магнитострикция в металлах, сплавах и ферритах группы Fe (при 100 K для Tb $\lambda = 5{,}3 \cdot 10^{-3}$, для Dy $\lambda = 8{,}0 \cdot 10^{-3}$, для Ni при той же температуре $\lambda = 4{,}0 \cdot 10^{-5}$). Установлено, что такие гигантские магнитострикции могут быть получены и при комнатных температурах путем использования ферримагнитных соединений: $DyFe_2$, $HoFe_2$, $DyFe_3$ и др. Точки Кюри этих соединений, поскольку в них входят атомы Fe, выше комнатной температуры. При этом здесь, как и в случае редкоземельных материалов высокого магнитного насыщения, необходимо принять меры к снижению “вредного” влияния огромной магнитной анизотропии, т.е. уменьшить величину поля насыщения H_s. После решения этой задачи редкоземельные материалы будут перспективны для создания различных технических устройств, например для получения ультразвука большой мощности, конструирования приборов, позволяющих с помощью магнитного поля управлять различными контактными и автоматическими устройствами.

5. **Прозрачные ферро- и ферримагнетики.** Редкоземельные ортоферриты и ферриты-гранаты, а также соединения EuO, EuSe являются прозрачными магнитоупорядоченными веществами в видимой и в ближней инфракрасной областях спектра. Кроме того, редкоземельные ортоферриты имеют гигантские величины вращения плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея). Эти вещества – перспективные материалы для модуляторов света и других оптических устройств, в частности для управления лазерным лучом с помощью переменного магнитного поля.

Большая величина угла Фарадея у редкоземельных ортоферритов позволяет получать очень контрастные картины доменной структуры. Так, в пластинах ортоферрита тулия, вырезанных перпендикулярно оптической оси, наблюдается строго периодическая полосовая доменная структура. Она представляет собой дифракционную фазовую решетку для света. С помощью такой решетки можно наблюдать дифракцию луча лазера. Накладывая магнитное поле и изменяя температуру, можно уменьшать период доменной структуры и тем самым изменять положение дифракционных максимумов.

Смещение дифракционной картины под влиянием поля можно использовать для сканирования светового луча, в частности, в устройствах записи и считывания оптической информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перечисленные примеры применений редкоземельных магнитных материалов показывают, что они весьма перспективны. Многие из них обладают уникальными свойствами, которые нельзя получить в материалах, синтезируемых на основе группы Fe. Использование огромных величин магнитной анизотропии и магнитострикции в редкоземельных веществах и нахождение путей управления ими, бесспорно, будут иметь большое значение для получения магнитных материалов с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белов К.П.* Редкоземельные магнетики и их применение. М.: Наука, 1980.

2. Физика и химия редкоземельных элементов. Справочник / Под ред. Е.М. Савицкого. М.: Металургия, 1982.

3. *Тейлор К.* Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М.: Мир, 1974.